



UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS I - CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS - CCT
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
GRADUAÇÃO EM LICENCIATURA EM FÍSICA

TATIELE RODRIGUES DE OLIVEIRA

**UM ESTUDO SOBRE A RADIAÇÃO CÓSMICA DE FUNDO
E O PROBLEMA DA ABUNDÂNCIA DOS ELEMENTOS
LEVES**

CAMPINA GRANDE - PB
2022

TATIELE RODRIGUES DE OLIVEIRA

UM ESTUDO SOBRE A RADIAÇÃO CÓSMICA DE FUNDO E O
PROBLEMA DA ABUNDÂNCIA DOS ELEMENTOS LEVES

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Licenciatura em Física da Universidade
Estadual da Paraíba, em cumprimento
à exigência para obtenção do grau de
Licenciada em Física.

Orientadora: Profa. Dra. Raissa Maria
Pimentel Neves

CAMPINA GRANDE - PB
2022

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

O48e Oliveira, Tatiele Rodrigues de.
Um estudo sobre a radiação cósmica de fundo e o problema da abundância dos elementos leves [manuscrito] / Tatiele Rodrigues de Oliveira. - 2022.
34 p. : il. colorido.

Digitado.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2022.
"Orientação : Profa. Dra. Raissa Maria Pimentel Neves, UEPB - Universidade Estadual da Paraíba."

1. Elementos leves. 2. Radiação Cósmica. 3. Cosmologia Termodinâmica. I. Título

21. ed. CDD 523.1

TATIELE RODRIGUES DE OLIVEIRA

UM ESTUDO SOBRE A RADIAÇÃO CÓSMICA DE FUNDO E O PROBLEMA DA ABUNDÂNCIA DOS ELEMENTOS LEVES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Licenciatura em Física da Universidade Estadual da Paraíba, em cumprimento à exigência para obtenção do grau de Licenciada em Física.

Orientadora: Profa. Dra. Raissa Maria Pimentel Neves

Aprovado em : 30/11/2022

BANCA EXAMINADORA

Raissa Maria Pimentel Neves

Profa. Dra. Raissa Maria Pimentel Neves (DF/UEPB)
Orientadora

Jean Paulo Spinelly da Silva

Prof. Dr. Jean Paulo Spinelly da Silva (DF/UEPB)

Examinador Interno

João Rafael Lucio dos Santos

Prof. Dr. João Rafael Lucio dos Santos (DF/UFCG)
Examinador Externo

Aos meus pais, agricultores e semi-analfabetos,
por sempre acreditarem na educação
como um caminho transformador
e aos meus irmãos Danilo e Tiago
por me ajudarem a trilhar o caminho.

AGRADECIMENTOS

Ao Deus da vida, Criador de tudo e de todas as coisas, pela oportunidade de chegar até aqui. À toda a minha família, meus pais Arnaldo e Maria de Fátima; minhas irmãs, Ana Lúcia (quem me alfabetizou em casa, minha inspiração), Ana Clara, Ana Cristina, Ana Vitória e Ana Carolina. Meus irmãos, Danilo, Tiago, José Paulo, Joel Carlos e Paulo César. E ao meu presente divino, Kaio José.

Há um Trecho de uma carta de Isaac Newton para Robert Hooke em 5 de Fevereiro de 1676, que diz: “Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes”, e confesso que não teria conseguido enxergar um horizonte maior de sonhos sem que vocês estivessem comigo, Patrick Oliveira, Liziane Fernandes, Ângela Soares, Gabriela Dias e Wllysses Melo. Vocês sempre estarão tatuados em meu coração.

À todos os professores que passaram pela minha vida, desde o meu primeiro contato com a sala de aula, até a minha graduação, onde destaco meu primeiro professor de Física, Joseberto Rosendo (culpa sua, eu ter sofrido esses anos todinho na graduação), de modo especial a Professora Deusalete Vilar, pelo primeiro contato com a cosmologia e por ter feito com que eu me apaixonasse perdidamente pela área, ao Prof. Dr. Jean Spinelly por todos os conselhos de vida e acadêmicos, pelos incentivos diários e por mostrar a Física como de fato ela é, em sua beleza e infinitude de aplicações, é encorajador e motivador ver um docente que ama aquilo que faz, um exemplo de professor a ser seguido na vida acadêmica.

A minha orientadora Raissa Pimentel, minha maior inspiração como pessoa e profissional, por todas as raivas que passei na disciplina de Introdução a Astrofísica e Astronomia, eu não estaria tão envolvida com os primeiros minutos da criação do universo e tão encantada com esse cosmos acima de nós se não fosse pela sua dedicação, didática e esse conhecimento inesgotável que tens. Sei que, agora, terei não apenas uma orientadora, mas uma amiga-irmã-confidente, da qual tenho a maior gratidão em tê-la em minha vida. Você é minha família e sei que nem preciso te falar isso! Obrigada por tudo e por tanto. Aprendi com você muito mais do que resolver uma equação ou escrever um trabalho de conclusão de curso, tive oportunidade de trilhar diversos caminhos nestes últimos semestres do meu curso, e nada disso teria sido possível sem seus ensinamentos e encorajamento em alçar os meus primeiros voos.

Por fim, agradeço a cada um, que de modo direto ou indireto, sempre estiveram me apoiando, aos quais se faz impossível citar todos os nomes, sejam meus alunos, colegas de trabalho, meu diretor Manuel Aquino pela paciência e minha ausência quando se fez necessário e ainda, minha eterna mainha do coração Rosenilda Raimundo, por todas às vezes que me acolheu como peregrina em sua casa e me amou como sua filha, você não tem noção do quanto és especial para mim. Amo muito cada um de vocês.

APLICANDO A RADIAÇÃO CÓSMICA DE FUNDO PARA INFERIR A QUANTIDADE DE ELEMENTOS LEVES DO UNIVERSO

Tatiele Rodrigues de Oliveira ¹

RESUMO

O Big Bang Nucleossíntese ocorreu nos primeiros minutos após o início do Universo e é responsável por grande parte da abundância dos elementos que conhecemos. Desta forma, este trabalho consta de uma revisão bibliográfica onde fizemos um estudo sobre a aplicação dos dados da Radiação Cósmica de Fundo para inferir a quantidade de elementos leves do Universo. Para estudarmos o problema dos elementos leves, precisamos de conceitos básicos da cosmologia, bem como uma extensão da cosmologia padrão em junção com a física de partículas e isto foi feito através das equações de Friedmann e da equação de Boltzmann acoplada.

PALAVRAS-CHAVE: Cosmologia. Elementos leves. Radiação. Partículas.

¹Graduanda em Licenciatura em Física pela Universidade Estadual da Paraíba

APPLYING THE COSMIC BACKGROUND RADIATION TO INFER THE QUANTITY OF LIGHT ELEMENTS IN THE UNIVERSE.

Tatiele Rodrigues de Oliveira ¹

ABSTRACT

The Big Bang Nucleosynthesis occurred in the first few minutes after the beginning of the Universe and is responsible for most of the abundance of elements that we know. In this way, this work consists of a bibliographic review where we did a study on the application of Cosmic Microwave Background data to infer the amount of light elements in the Universe. To study the problem of light elements, we need basic concepts of cosmology, as well as an extension of standard cosmology in conjunction with particle physics and this was done through the Friedmann equations and the coupled Boltzmann equation.

KEYWORDS: Cosmology. Light elements. Radiation. Particles.

¹Undergraduate Degree in Physics from the State University of Paraíba

Conteúdo

1	Introdução	8
2	Metodologia	10
3	Modelo Cosmológico Padrão	11
3.1	Relatividade Geral	11
3.1.1	Equações de Einstein	12
3.1.2	Tensor Energia-Momento	12
3.2	Princípio Cosmológico	13
3.3	Lei de Hubble e o desvio para o vermelho	14
3.4	Equações de Friedmann	15
3.5	Parâmetro Densidade	18
4	Radiação Cósmica de Fundo de Microondas	19
4.1	Satélites Espaciais	20
4.2	Flutuações anisotrópicas da RCFM	23
5	Cosmologia Termodinâmica	25
5.1	Recombinação do Universo	25
5.2	Equações de Boltzmann	25
5.3	Abundância dos Elementos Leves	28
6	Consideração Finais	31
6.1	Perspectivas Futuras	31
	Referências Bibliográficas	32

1 Introdução

Se olharmos bem ao nosso redor, podemos ver e citar diversas situações que envolvem a radiação. De fato, a radiação presente no nosso cotidiano foi descoberta, acidentalmente, por Henri Becquerel, em 1896 ao guardar em uma gaveta, um composto de urânio juntamente com uma chapa fotográfica, havendo depois revelado a chapa, percebeu nela os sinais da radiação. Por tanto, o tipo de radiação que abordaremos aqui advém de uma viagem longínqua pelo nosso universo, mais precisamente, em torno de 14 bilhões de anos viajando (à velocidade da luz) até chegar a nós, ou seja, quando o Universo tinha apenas 370 mil anos de existência.

As fortes evidências observacionais levam-nos a acreditar que o Universo surgiu a partir de um estado muito quente e denso chamado Big Bang (NEVES, 2004). Nesse período a sua Temperatura estava em torno de 3.000 K e os fótons e a matéria, que formavam o plasma primordial, estavam fortemente acoplados, ou seja, o que aconteceria com a matéria seria sentido também na radiação e vice-versa (VILELA, FERREIRA e WUENSCHÉ, 2004).

A ideia da existência de uma radiação que permeava o universo, surgiu a partir do estudo dos elementos leves. Após o resfriamento do Universo as partículas que foram formadas através do banho térmico que ocorreu após o período inflacionário começaram a interagir e deram origem a formação dos primeiros elementos químicos. Além disso, algumas dessas partículas davam indícios de uma radiação.

A composição química do Universo consiste principalmente de hidrogênio e hélio, com quantidades muito pequenas de todos os outros elementos químicos conhecidos. Se pesarmos todos os bárions existentes no Universo, cerca de 75% são hidrogênio, 24% hélio e 1% corresponde a todo o resto. Essa proporção deve-se ao fato de hidrogênio, deutério, trítio, hélio e lítio terem sido inicialmente produzidos nos três primeiros minutos após a criação do Universo, em um processo conhecido como nucleossíntese primordial. Desta

forma, quando analisamos o Lítio, percebemos que há uma discrepância muito grande pois, quando as sondas medem os dados do lítio, o valor é muito pequeno em relação ao valor obtido nos cálculos.

Sendo assim, a proposta deste trabalho é fazer um estudo sobre a radiação cósmica de fundo, que corresponde ao dado atual mais importante sobre o Universo, que é utilizada para inferir os valores dos elementos leves com melhor precisão.

A organização geral deste trabalho é da seguinte forma: No capítulo 2 apresentamos a metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso. Já no capítulo 3 apresentamos uma revisão sobre o modelo cosmológico padrão através da construção das equações de Einstein, visto que a partir delas conseguimos determinar as equações de Friedmann que descrevem um Universo em expansão ou contração, homogêneo e isotrópico, dentro do contexto da Teoria da Relatividade Geral.

No capítulo 4, discutimos a Radiação Cósmica de Fundos utilizando a parte histórica, onde conseguimos, através das flutuações de temperatura, ou seja, anisotropia do universo, identificar a abundância dos elementos leves.

Já no capítulo 5, estudamos a Cosmologia termodinâmica. Para isso, utilizamos a equação de Boltzmann acoplada para calcular a abundância dos elementos leves. Contudo, para estudar o problema dos elementos leves é necessário realizar uma extensão na cosmologia padrão inserindo novas fases em que a radiação tenha dominado.

Por fim, no capítulo 5 apresentamos as conclusões e as futuras perspectivas a serem desenvolvidas em relação a este trabalho de conclusão de curso.

2 Metodologia

A Radiação Cósmica de Fundo é o dado mais importante que temos sobre o universo, seus dados são utilizados para restringir modelos cosmológicos e inferir resultados sobre a detecção de elementos leves.

Este trabalho corresponde a um estudo de revisão bibliográfica sobre o problema dos elementos leves associados à radiação cósmica de fundos. Assim, realizamos um estudo sobre a cosmologia padrão e a equação de Boltzmann que juntos formam a base para o estudo teórico da abundância dos elementos leves.

A pesquisa bibliográfica, com base em material publicado, tem a vantagem de permitir uma cobertura ampla dos fenômenos estudados, bem maior do que a possibilidade que o pesquisador teria de investigar diretamente. O levantamento bibliográfico dos artigos foi realizado a partir da consulta em duas bases de dados: Google Acadêmico e Livros sobre cosmologia, no período de Agosto de 2021 à novembro de 2022. Para tal, utilizou-se os descritores Cosmologia, Radiação cósmica de fundos, Elementos leves e Partículas. Os textos encontrados foram selecionados pela leitura do título e resumo, sendo que estes deveriam atender a problemática da pesquisa, ou seja, os objetivos propostos no estudo da realidade brasileira.

3 Modelo Cosmológico Padrão

O Modelo Cosmológico Padrão corresponde ao modelo mais bem aceito até os dias atuais a frente dos teste observacionais realizados a luz dos dados da Radiação Cós mica de Fundo. Sua base está alicerçada na Teoria da Relatividade Geral, proposta por Albert Einstein no ano de 1915, e no Princípio Cosmológico, formulado por Edward Milne. Assim, este capítulo teve como finalidade a realização de um estudo sobre as principais descobertas que compõe o Modelo Cosmológico Padrão e que, por sua vez, levaram ao desenvolvimento da Cosmologia Téorica e Observacional nas últimas décadas.

3.1 Relatividade Geral

A Teoria da Relatividade Geral (TRG), tem inúmeras aplicações nas áreas da Cosmologia e Gravitação. A Cosmologia Téorica utiliza as equações da TRG para descrever o comportamento do Universo através da construção de modelos cosmológicos que são testados com base nas observações de dados cosmológicos cada vez mais precisos, que são coletados por alguns dos principais satélites, como o COBE, WMAP e Planck. (G. F. Smoot et al., 1922; H. V. Peiris et al., 2003; Planck Collaboration, N. Aghanim et al.2018).

Logo após a publicação da Teoria da Relatividade Restrita em 1905, Einstein observou que a teoria da gravitação newtoniana era incompatível com a sua teoria. Desta forma, foi necessário a criação da teoria da gravitação relativística (Einstein, 1917.et al. Neves, 2020).

Para a elaboração da TRG Einstein enuncia dois postulados que formam a base de sua teoria.

- **Postulados da Relatividade Geral**

As leis da natureza são as mesmas em todos os referenciais, sejam eles, inerciais ou não. Esse postulado generaliza o conceito de igualdade para todos os observadores, independentemente da sua posição, orientação e estado de movimento.

- **Princípio da Equivalência.**

Em todos os pontos do espaço-tempo em um campo gravitacional arbitrário, é possível escolher um sistema de coordenadas local, no qual os efeitos devido à aceleração do referencial e os da gravitação são equivalentes.

3.1.1 Equações de Einstein

As equações de Einstein formam um conjunto de equações que juntas conseguem descrever toda a geometria do espaço-tempo como também consideram todo o conteúdo de matéria e energia existente no universo através do tensor energia-momento. Matematicamente, as equações de Einstein são escritas da seguinte forma,

$$R^{\mu\nu} - \frac{1}{2}g^{\mu\nu}R + \Lambda g^{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T^{\mu\nu}, \quad (1)$$

onde o tensor de curvatura de Einstein dado por:

$$G^{\mu\nu} = R^{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg^{\mu\nu}, \quad (2)$$

no qual R é o escalar de Ricci, dado por:

$$R = g^{\mu\nu}R_{\mu\nu}. \quad (3)$$

3.1.2 Tensor Energia-Momento

O tensor energia-momento é uma ferramenta capaz de descrever a matéria e energia do universo. Essa ferramenta, no contexto da teoria clássica de campos é um tensor de segunda ordem, representado por $T^{\nu\mu}$ cuja equação é dada por:

$$T^{\nu\mu} = \left(\rho + \frac{p}{c^2} \right) u^\nu u^\mu - p g^{\nu\mu}. \quad (4)$$

O significado físico das componentes do Tensor Energia-Momento são:

- T^{00} : densidade de energia;
- T^{ii} : densidade de pressão;
- T^{i0} : densidade de momento linear.

3.2 Princípio Cosmológico

O Princípio Cosmológico (PC), proposto pelo astrofísico britânico Edward Milne em 1933, que afirma que diferentes observadores devem ter a mesma interpretação sobre as propriedades do Universo. Posteriormente, o princípio cosmológico foi reforçado pelas observações de Walter Baade, as quais indicavam que a Via Láctea é uma galáxia típica, ou seja, não possui nenhuma propriedade especial quando comparada com suas semelhantes.

Esse princípio afirma que o Universo só é homogêneo e isotrópico em escalas acima de 100 Mpc, caso contrário, o Universo se comporta de maneira inhomogênea e anisotrópica. A homogeneidade implica que o Universo é invariante por translação, ou seja, é o mesmo em todos os pontos. A isotropia mostra que o Universo é invariante por rotação, ou seja, não existe direção privilegiada.

3.3 Lei de Hubble e o desvio para o vermelho

Até o final do século XIX os cientistas não sabiam que a luz proveniente das galáxias era transferida para redshifts de maiores comprimentos de onda, ao invés de serem deslocadas para blueshifts com comprimentos menores. A modificação observada no espectro de uma galáxia através das linhas de absorção espectral da radiação permite analisar o comportamento relativo entre a fonte e o observador por meio do efeito Doppler [Neves, 2020], cuja relação é

$$z = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{em}}{\lambda_{em}}, \quad (5)$$

onde z representa o desvio para o vermelho (*redshift*), λ_{em} é o comprimento de onda de emissão e λ_{obs} o comprimento de onda observado. A equação (5) descreve três possíveis casos:

- se $z < 0$, a fonte está se aproximando do observador, isto configura em um blueshift (desvio para o azul);
- se $z = 0$, a fonte não se desloca em relação ao observador;
- e quando, $z > 0$, a fonte se afasta do observador, o que resulta em um redshift (desvio para o vermelho) [Neves, 2020 p.13].

O astrônomo Edwin Hubble investiu muito esforço para medir as distâncias das galáxias. Em 1929, ele havia estimado distâncias para uma amostra de 20 galáxias, notando que as galáxias mais distantes tinham maiores desvios para o vermelho, ou seja, tinham velocidades maiores à medida em que se afastaram (RYDEN, 2016). A Figura mostra uma comparação dos resultados obtidos em 1929 com os dados atuais para a qualidade de galáxias estimadas, o que reforça os resultados observacionais de Hubble.

Deste modo, Neves (2020) mostra que Hubble estabeleceu a existência de uma relação linear entre a velocidade de afastamento v de uma galáxia e sua distância ao observador.

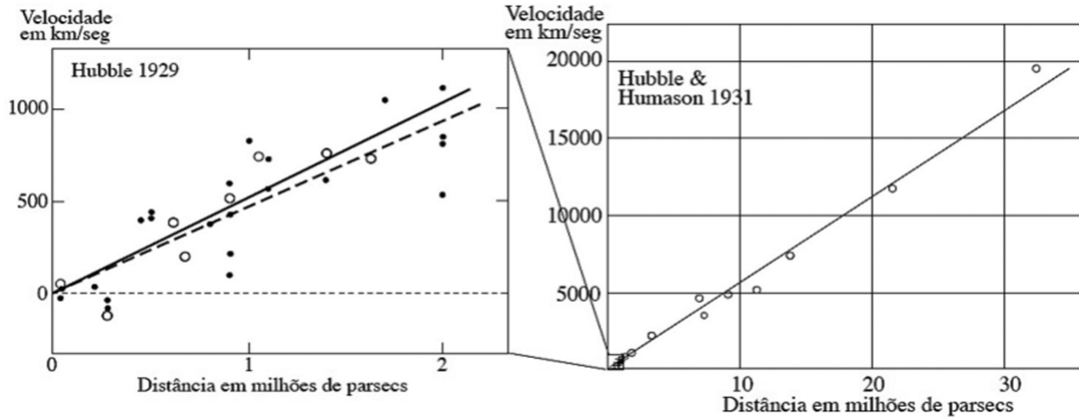


Figura 1: Relação entre a velocidade de recessão e a distância. O quadro da esquerda apresenta o resultado de Hubble. O quadro da direita refere-se ao dados atuais. Figura retirada de Gival, Rev. Bras. de Ens. de Fis., vol. 40, nº 2, e2318 (2018)

A lei de Hubble afirma que:

$$v = H(t)d \quad (6)$$

onde a constante de Hubble $H(t)$ representa a taxa de expansão do Universo.

É importante destacar que embora $H(t)$ tenha sido considerada como uma constante, atualmente existe uma imprecisão relacionada a seu valor, uma vez que dependendo do redshift que aferimos o seu valor, os resultados apresentamos mudanças significativas. Em (FREEDMAN, et al., 2019) os autores revelam que usando os dados da RCF, gigantes vermelhas e supernovas, respectivamente, temos:

$$H_0 = (67.36 \pm 0.54) \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1};$$

$$H_0 = (69.8 \pm 0.8) \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1};$$

$$H_0 = (73.52 \pm 1.62) \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}.$$

3.4 Equações de Friedmann

As equações de Friedmann formam um conjunto de equações em cosmologia física que governam a expansão métrica do espaço em modelos homogêneos e isotrópicos do Universo, dentro do contexto da Teoria da Relatividade Geral (Neves, 2020). Elas são

obtidas a partir da combinação da métrica de Friedmann-Robertson-Lemaître-Walker (FRLW) que pode ser escrita como

$$ds^2 = -dt^2 + a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 (d\theta^2 + \text{sen}^2\theta d\phi^2) \right]; \quad (7)$$

na qual $a(t)$ é o fator de escala cósmica que determina como as dimensões espaciais variam no tempo e k representa constante de curvatura do Universo, que pode assumir valores 1, -1 e 0 a depender da geometria do universo considerada. Todavia, os dados atuais mostram que o Universo apresenta-se plano, logo assumimos que $k = 0$.

Conhecendo a métrica e fazendo uso do postulado de Weyl, que introduz o fluido perfeito, juntamente com a equação de Einstein, conseguimos encontrar as equações que explicam toda a dinâmica do universo, as chamadas **Equações de Friedmann**.

A primeira equação de Friedmann mostra a expansão do Universo e relaciona o Termo de fontes, em que descreve os causadores da mudança dinâmica do Universo equivalente à energia potencial gravitacional, e é escrita como

$$\frac{\dot{a}^2}{a^2} = \frac{8\pi\rho}{3} - \frac{\Lambda}{3} - \frac{k}{a^2}. \quad (8)$$

Já a segunda equação relaciona a aceleração com os termos de fonte, que contém implicitamente a primeira lei da termodinâmica.

$$\frac{\ddot{a}}{a} = \frac{-4\pi}{3}(\rho + 3p) - \frac{\Lambda}{3}. \quad (9)$$

Além disso, temos que a conservação do tensor energia-momento leva a equação da continuidade para um fluido perfeito, cuja relação é

$$\dot{\rho} + 3H(\rho + p) = 0, \quad (10)$$

Onde ρ representa a densidade de energia e p a pressão. Essas duas quantidades se relacionam através da equação de estado $w = p/\rho$. Sabemos ainda de (10) que o parâmetro de Hubble H , pode ser escrita como sendo:

$$H = \frac{\dot{a}}{a}. \quad (11)$$

Substituindo a equação (11) e a equação de estado em (10) teremos:

$$\dot{\rho} + 3\frac{\dot{a}}{a}(\rho + \rho w) = 0, \quad (12)$$

$$\frac{d\rho}{dt} = -3\rho(1+w)\frac{1}{a}\frac{da}{dt}. \quad (13)$$

ou ainda,

$$\frac{d\rho}{\rho} = -3\rho(1+w)\frac{1}{a}da. \quad (14)$$

Aplicando, agora, a integral em (14), temos

$$\int \frac{1}{\rho} = -3(1+w) \int \frac{1}{a}da; \quad (15)$$

$$\ln\left(\frac{d\rho}{\rho_0}\right) = -3(1+w)\ln\left(\frac{a}{a_0}\right); \quad (16)$$

$$\ln\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right) = \ln\left(\frac{a}{a_0}\right)^{-3(1+w)}, \quad (17)$$

O que nos resulta em

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{a}{a_0}\right)^{-3(1+w)}, \quad (18)$$

ou ainda

$$\rho \sim a^{-3(1+w)}. \quad (19)$$

Poderemos ver na tabela abaixo os Dados da equação de estado, densidade de energia e fator de escala para época da radiação e matéria.

Tabela 1: Dados da equação de estado, densidade de energia e fator de escala para época da radiação e matéria

Radiação	$\omega = 1/3$	$\rho \propto a^{-4}$	$a \propto (t - t_0)^{1/2}$
Matéria	$\omega = 0$	$\rho \propto a^{-3}$	$a \propto (t - t_0)^{2/3}$

3.5 Parâmetro Densidade

Um dos principais objetivos da Cosmologia Observacional é medir o valor dos mais diversos parâmetros cosmológicos a partir de observações. É uma prática padrão em cosmologia, especificar modelos cosmológicos através de alguns parâmetros.

Considerando que o nosso universo é composto por matéria, radiação e energia, podemos calcular um parâmetro de densidade para cada uma dessas fases, a partir da equação

$$\Omega_m + \Omega_r + \Omega_{ED} + \Omega_k = 1, \quad (20)$$

onde Ω_m é a densidade de matéria, Ω_r é a densidade de radiação, Ω_{ED} é a densidade de Energia escura e Ω_k é a densidade de curvatura.

4 Radiação Cósmica de Fundo de Microondas

A Radiação Cósmica de Fundo (RCF), também conhecida como CMB, derivada do inglês *Cosmic Microwave Background*, é o dado mais importante que temos sobre o Universo; seus dados são utilizados para inúmeras aplicações dentro da cosmologia. Podemos utilizar os dados da RCF para restringir modelos cosmológicos, inferir resultados sobre a detecção de elementos leves, etc.

A ideia de existir uma radiação que permeava o nosso universo primordial, já estava em discussão em artigos publicados desde a década de 80, porém a ideia não chamou a atenção dos cosmólogos, uma vez que, existiam muitas indagações sobre a origem do universo e o que acontecera após a grande explosão térmica (PENZIAS e WILSON, 1965; DICKE, 1946).

Sobre a composição da radiação cósmica de fundo, podemos interpretar da seguinte forma:

“A radiação é composta de fótons remanescentes do universo primitivo e carrega consigo informações importantes sobre a formação e estrutura do universo atual em larga escala, indicando que no passado o universo era mais denso, quente e expandiu adiabaticamente esfriando através da relação $T \propto a^{-1}$, encontrando-se, hoje, na forma de micro-ondas a uma temperatura de $T_{cmb} \propto 2.725K$.” (NEVES, 2004, p.23-24)

O nosso Universo, em seus primeiros minutos, estava com uma temperatura muito alta, em torno de 3000 K, os fótons e a matéria que formavam o plasma primordial onde matéria e radiação desacoplam, ou seja, havia partículas, porém não interagiam.

Por mais que a história da RCF sempre relata que a existência dessa radiação tenha sido prevista teoricamente por George Gamov, Ralph Alpher e Robert Herman em 1948, e que foi descoberta experimentalmente em 1965 por Arno Penzias e Robert Woodrow Wilson, os quais receberam o Prêmio Nobel de Física em 1978, e terem recebido maior

destaque, outros pesquisadores ao longo da história tiveram valores muito aproximados com os atuais (vide tabela abaixo)

Ano	Pesquisador(es)	Temperatura da Radiação C3smica de Fundo
1988	Guillaume	5 K
1926	Eddington	3,2 K
1933	Regener	2,8 K
1949	Gamow	5 K
1954	Finlay-Freundlich	6,0 K
1965	Penzias e Wilson	3,5 K

Tabela 2: Estudos Anteriores à Penzias e Wilson (ASSIS E NEVES,2003)

4.1 Sat3lites Espaciais

A RCF foi prevista por Gamow, Alpher e Herman em 1948 quando estudavam a origem dos elementos qu3micos e o estado da mat3ria no universo primordial. Penzias e Wilson construíram um radi3metro o qual pretendiam utilizar para experi3ncias de radioastronomia e comunica33o via sat3lite. O que eles n3o esperavam era detectar varia33es de temperaturas muito altas (ru3ido t3rmico) de 3,5K que n3o sabiam explicar a exist3ncia, pois n3o importava para qual lado do c3u apontasse o radi3metro o ru3ido permanecia, o que levou-os a acreditar que seriam defeitos no aparelho, onde limpavam toda a poeira, mas esse ru3ido de alta temperatura era na verdade as primeiras comprova33es observacionais da RCF.

Ap3s a descoberta da RCF, houve um investimento muito grande em pesquisas e desenvolvimentos de sondas espaciais para a medi33o dessa radia33o, o que resultou em grandes avan3os na tecnologia, j3 que ela 3 um dos dados mais importantes para a cosmologia.

A primeira sonda lan3ada foi o COBE (Cosmic Background Explorer – Explorador do Fundo C3smico), da NASA. Seu objetivo era analisar a radia33o c3smica de fundo do

universo e fornecer medidas que pudessem ajudar na compreensão do cosmos, o qual mais tarde mostra a RCF como sendo uma estrutura fóssil da grande explosão térmica que deu origem ao universo, o Big Bang (MARQUES, 2012).

Construído desde a década de 1970, o COBE deveria ter sido lançado pelo Space Shuttle (frota de ônibus espacial da Nasa). Porém o acidente do Challenger, que se desintegrou numa violenta explosão, apenas 73 segundos após a decolagem em 1986, motivou a suspensão do programa espacial nos Estados Unidos e o lançamento do COBE aconteceu apenas em 1989. Neste intervalo de tempo alguns dos instrumentos do COBE foram lançados em balão estratosférico a partir do Brasil, conseguindo observar uma boa parte do céu e providenciando os necessários testes experimentais (J. C. Mather et al.,1990).

Durante sua operação, o satélite COBE foi responsável pela realização de alguns experiemntos, aos quais três destes merecem destaque:

- DMR (Differential Microwave radiometer), cujo objetivo era revelar como era o Universo há mais de 13 bilhões de anos, sendo possível se ter uma idéia de como as grandes estruturas surgiram (WUENSCHKE, 2005). As Frequências observadas foram de - 31.5 GHz, 53 GHz e 90 GHz – escolhidas de modo a minimizar as interferências da emissão galáxia e a longa campanha de observação serviria para observar as pequenas irregularidades do Fundo Cósmico em Microondas.(MARQUES, 2012).
- O FIRAS (Far Infrared Spectrometer), espectrômetro de infravermelhos, cuja missão era conseguir medir o espectro em frequência do FRCM.
- O DIRBE (Diffuse InfraRed Experiment) foi concebido para detectar a radiação infravermelha de fundo (CBI – Cosmic Infrared Background) produzida por estrelas e galáxias. A gama de comprimentos de onda analisados várias entre 1.25 μm e 240 μm .

A Microwave Anisotropy Probe (MAP) ou WMAP é uma sonda espacial da NASA, cuja missão é estudar o espaço profundo e medir as diferenças de temperatura que se observam na radiação cósmica de fundo em micro-ondas, um remanescente do Big Bang. Lançada através de um foguete em 30 de junho de 2001 na Flórida, Estados Unidos, a sonda WMAP foi projetada para proporcionar uma visão mais detalhada sobre as diferenças sutis de temperatura na Radiação Cósmica de Fundo, que foi detectada pela primeira vez pela sonda COBE. Embora tenha sido lançada com a sigla MAP, foi mais tarde renomeada, acrescentando o W em homenagem David T. Wilkinson, um dos membros da equipe que a projetou, e que morreu em setembro do ano seguinte ao seu lançamento. (H. V. Peiris et al., 2003)

Além de detectar a idade mais precisa do Universo, a WMAP mostrou que a matéria comum representa apenas 4,6% do Universo atual e que a maior parte do Universo consiste em dois de seus grandes mistérios, a matéria escura, que compõe 23% do universo, e a Energia Escura que é gravitacionalmente repulsiva. Além da confirmação da sua existência, a WMAP determinou que ela preenche 72% do cosmos.

Mesmo com as suas incontáveis contribuições para a cosmologia, em 06 de outubro de 2010 a NASA anuncia o encerramento das atividades da WMAP a qual teve apenas 1% na margem de erro em relação a estimativa da idade do universo. (C. L. Bennett et al., 2013)

Por fim, o lançamento mais recente que temos a respeito das sondas espaciais dedicadas exclusivamente a RCF é o Planck. Usado para captar a radiação que vem do céu em duas faixas de frequências, uma alta e outra baixa, a sonda utiliza-se de dois instrumentos científicos distintos (Low Frequency Instrument e o High Frequency Instrument).

A sonda Planck foi lançada em maio de 2009 para explicar a história do Universo, com uma resolução maior que o COBE e o WMAP. As detecções de Planck estabeleceram uma idade mais específica para nosso universo, 13,8 bilhões de anos, um pouco mais velho do

que WMAP (13.750 bilhões de anos). Além disso, a composição do universo também foi redefinida, passando a ser 4,8% de matéria ordinária (átomos), 25,8% de matéria escura e 69,4% de energia escura. (Planck,2018)

4.2 Flutuações anisotrópicas da RCFM

De acordo com Neves (2004, p.25) as flutuações térmicas ou anisotropias da CMB, são bastante pequenas na ordem de 10^{-5} , ver Figura 2. Além disso, a RCF corresponde ao dado atual mais importante para a cosmologia, uma vez que, originou-se em uma época muito mais simples da evolução do universo e sustentam o princípio cosmológico. As pequenas anisotropias são fundamentais para que as grandes estruturas pudessem ter sido formadas e acredita-se que estas anisotropias tenham sido originadas durante a época da inflação, quando pequenas flutuações quânticas foram expandidas para dimensões cosmológicas.

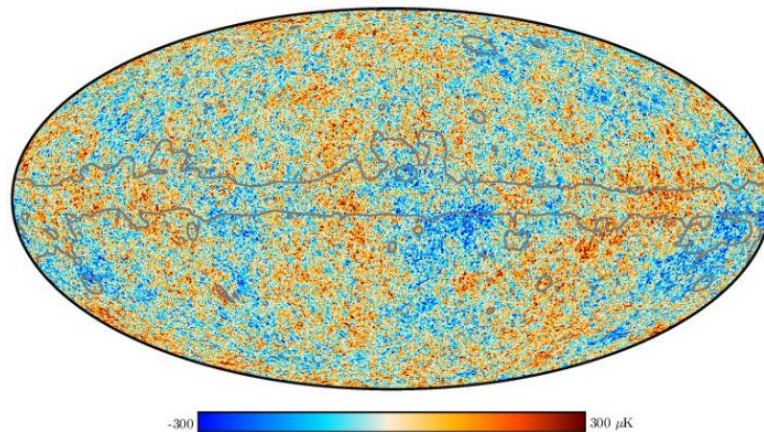


Figura 2: Mapeamento da radiação cósmica de fundo feita pelo satélite Planck. Fonte:Planck Collaboration, 2018.

Neste mapeamento feito pelo satélite Planck a cor vermelha do mapa, indica temperaturas mais elevadas, o que indica pontos espaciais de maior densidade. Já os

pontos na cor azul, correspondem a temperaturas mais baixas, indicando pontos com menos densidade.

5 Cosmologia Termodinâmica

5.1 Recombinação do Universo

Para explicar a origem das partículas, devemos recorrer à fase do desacoplamento térmico, que relaciona diretamente a taxa de expansão do universo com a taxa de interação entre as partículas.

Com a diminuição do número de elétrons livres, a matéria e a radiação não mais interagem de forma significativa e ocorreu o que denominamos de desacoplamento entre a radiação e a matéria. De acordo com Oliveira (2021, p.17) este mecanismo de produção considera que, no início do universo, todas as partículas do Modelo Padrão interagem a uma taxa $\gamma \equiv n \cdot \sigma \cdot v$ (onde n é a densidade de número da partícula, σ é a seção de choque e v a velocidade da partícula) muito maior do que a taxa de expansão do universo H , garantindo o equilíbrio térmico. Com a expansão do universo, sua temperatura diminuía, de forma que, $\Gamma \sim H$ (para uma dada espécie do MP).

5.2 Equações de Boltzmann

Para entendermos como as partículas se comportam no início do universo devemos compreender como a sua função de distribuição evolui neste período. A equação que nos permite estudar esta evolução é conhecida como equação de Boltzmann.

Como o objetivo central do trabalho é estudar a produção dos elementos leves do Universo, vamos utilizar a equação acoplada de Boltzmann que relaciona diretamente a taxa de expansão do universo com a taxa de interação entre as partículas. Partindo da equação da Cosmologia não padrão e utilizando as Equações acopladas de Boltzmann

teremos:

$$\frac{dn_\chi}{dt} = -3Hn_\chi - \langle \sigma v \rangle [n_\chi^2 - n_\chi^{eq^2}], \quad (21)$$

onde, χ é o número de elemento em abundância, n_χ densidade numérica, $n_\chi^{eq^2}$ densidade numérica de equilíbrio, H a constante de Hubble, e $\langle \sigma v \rangle$ a sessão de choque das partículas.

Da equação (21) segue que o primeiro termo ($-3Hn_\chi$) representa a expansão do Universo, ou seja, a conexão com a cosmologia. Já o segundo termo corresponde à perda e ganho de partículas por meio da aniquilação ou criação.

Com a finalidade de dimensionar o Universo em função da abundância Y_χ e da temperatura e massa das partículas, temos que:

$$Y_\chi = \frac{n_\chi}{s}, \quad (22)$$

onde s é a densidade de entropia, definida por:

$$s = \frac{2\pi^2}{45} g_* s(T) T^3, \quad (23)$$

sendo $g_* s(T)$ o número de graus de liberdade relativísticos, em conta os graus de liberdade das partículas relativísticas em equilíbrio e pode ser obtido a partir da seguinte relação,

$$g_* s(T) = \sum_{\text{bosóns}} g_i \left(\frac{T_i}{T} \right)^4 + \frac{7}{8} \sum_{\text{férmions}} g_i \left(\frac{T_i}{T} \right)^4. \quad (24)$$

É importante destacar que a escala de tempo da expansão do Universo é longa comparada com as escalas de tempo para reações que mantém equilíbrio térmico. Desta forma, podemos considerar que o gás cosmológico está em equilíbrio, mas sofre mudanças adiabáticas como expansão lenta. Nestas condições, vemos que a entropia por volume comóvel será constante. Logo, a finalidade de encontrar a densidade de entropia em situações de equilíbrio, fizemos uso da seguinte relação termodinâmica,

$$\begin{aligned} TdS &= d(\rho V) + pdV, \\ dS &= \frac{1}{T} \left[(\rho + p) + V \frac{d\rho}{dT} dT \right]. \end{aligned} \quad (25)$$

Podemos escrever a entropia como uma função $S = S(V, T)$, assim

$$dS = \frac{\partial S}{\partial V} dV + \frac{\partial S}{\partial T} dT. \quad (26)$$

Comparando as equações (28) e (26) obtemos as seguintes expressões

$$dp = \frac{\rho + p}{T} dT, \quad (27)$$

$$s = \frac{\partial S}{\partial V} = \frac{\rho + p}{T}. \quad (28)$$

onde p é a densidade de pressão, ρ a densidade do fluido perfeito e s a densidade de entropia.

Para obter a relação entre a densidade de entropia e o fator de escala do Universo faremos uso da equação da continuidade para um fluido perfeito que é dada por:

$$\dot{\rho} + 3H(\rho + p) = 0 \quad (29)$$

Usando o fato do equilíbrio térmico das partículas, podemos usar:

$$\dot{\rho} = \dot{s}T; \quad (30)$$

$$\dot{p} = \dot{T}s. \quad (31)$$

Portanto, encontramos

$$s \propto a^{-3}. \quad (32)$$

Este resultado resulta de uma consequência importante relacionada com a conservação da entropia, em situação de equilíbrio.

Agora, voltando novamente a atenção para a equação de Boltzmann e substituindo Y_{chi} na equação (21). E considerando que da equação (29) resulta que $\dot{s} = -3Hs$, podemos reescrever a equação de Boltzmann como

$$\frac{dY_\chi}{dt} = - \langle \sigma v \rangle s^2 [Y_\chi^2 - Y_\chi^{eq^2}] \quad (33)$$

Para parametrizar em termos da temperatura, faremos $x = m_\chi/T$,

$$\frac{dx}{dt} = - \frac{x}{T} \frac{dT}{dt}, \quad (34)$$

Logo, a equação de Boltzmann em termos da abundância fica

$$\frac{dY_\chi}{dx} = - \langle \sigma v \rangle \frac{s^2}{xH} [Y_\chi^2 - Y_\chi^{eq^2}] \quad (35)$$

A equação (35) pode ser usada para estudar o problema associado a abundância dos elementos leves e em específico ao problema do Lítio, mas ela também pode ser utilizada para estudar os possíveis candidatos a matéria escura, porém este não é o foco do trabalho. Neste caso o χ deixaria de ser um elemento para ser uma partícula.

5.3 Abundância dos Elementos Leves

Após o resfriamento do Universo Partículas se agrupavam e formavam os primeiros elementos (ver na figura (3) abaixo)

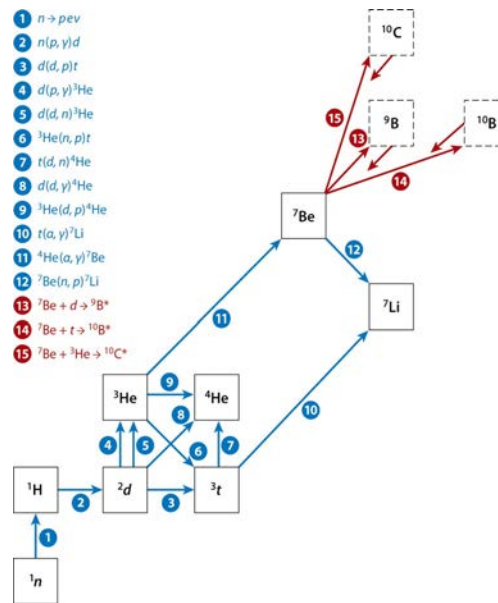


Figura 3: Gráfico da criação dos primeiros elementos leves. Fonte: The Annual Review of Nuclear and Particle Science. May/2011.61:47-68.

Na Figura 3 o primeiro elemento da cadeia de reações nucleares é o átomo de hidrogênio (H), que corresponde ao elemento mais abundante do universo em conjunto com o Hélio. Logo em seguida novos elementos foram criados a partir do decaimento das partículas e

suas interações com outros elementos são criados novos isótopos (possuem quantidade diferentes de de prótons e nêutrons).

Esses elementos foram criados à medida que a temperatura foi diminuindo, e essas partículas foram formando os elementos provenientes de fótons dessa mesma época, por isso os dados da RCF são utilizados para inferir os valores dos elementos leves.

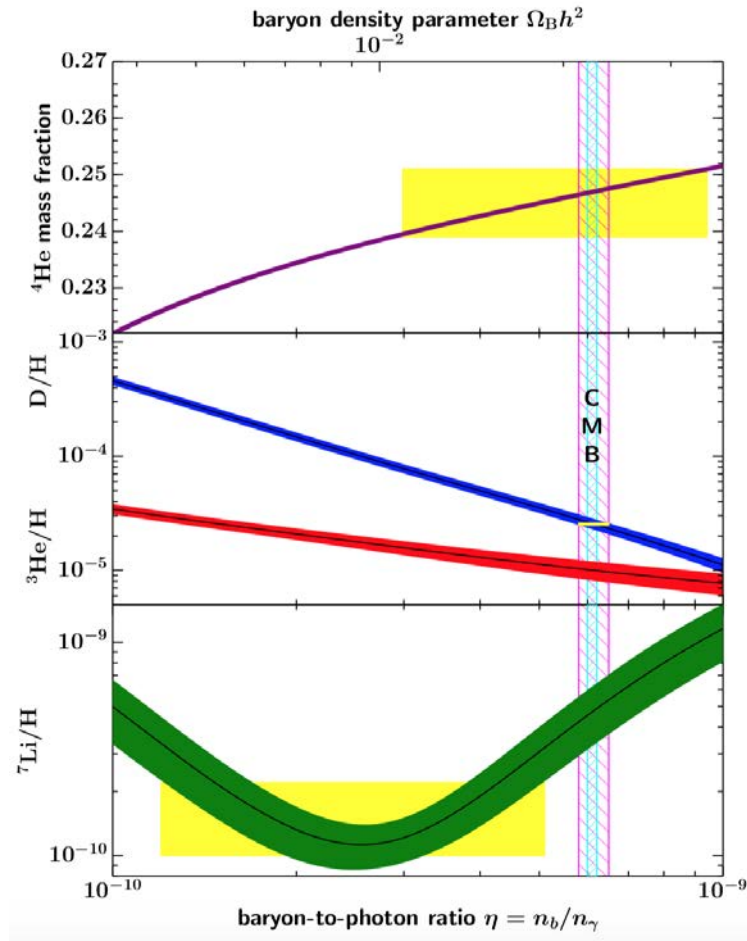


Figura 4: Gráfico da abundância dos Elementos Leves, calculado de acordo com os dados da CMB. Fonte: The Annual Review of Nuclear and Particle Science. May/2011.61:47-68.

Na figura 4, podemos ver o gráfico da abundância dos elementos leves criados na época da Big Bang Nucleossíntese (BBN), utilizando os dados da Radiação Cósmica de Fundo. Onde o qual mais se destaca é o ${}^7\text{Li}$ e sua abundância representado na cor verde. Além disso, os valores medidos de acordo com (Tanabashi, M. et al., 2018) são:

$${}^4\text{He} = 0.245 \pm 0.003 \quad (36)$$

$$\frac{D}{H} = (2.569 \pm 0.027) \times 10^{-5} \quad (37)$$

$$\frac{{}^7\text{Li}}{D} = (1.6 \pm 0.3) \times 10^{-10} \quad (38)$$

Para estudar o problema dos elementos Leves, devemos recorrer a uma extensão da física, que é a cosmologia além do modelo padrão. E essa cosmologia não-padrão considera que podem ter passado por pequenas fases de radiação (Arcadi, G. et al, 2022;), onde:

$$\rho_\phi \propto a^{-(4+n)} \quad (39)$$

onde n codifica a evolução cosmológica não padronizada. Observe que para $n = 0$, recuperamos a energia da radiação densidade $\rho_R(t) \propto a(t)^{-4}$ que corresponde ao caso padrão.

6 Consideração Finais

Concluimos que para resolver o problema relacionado a quantidade de elementos leves presentes no universo precisamos estudar sobre algumas partes da cosmologia, uma vez que é importante entender todos esses conceitos para poder estudar uma extensão da cosmologia não-padrão, como vimos no último capítulo. E entendemos também a importância de utilizar os dados da Radiação Cósmica de Fundo para estudar o problema dos elementos leves, uma vez que ela é considerada uma das relíquias do universo primordial e que seus dados realmente são importante para inferir medições, não apenas dos elementos leves, mais também dos parâmetros como citados no começo, e, principalmente para a restrição dos elementos.

6.1 Perspectivas Futuras

1. Calcular a primeira e segunda fase das reações nucleares que correspondem a aniquilação ou criação de partículas na BBN para um determinado modelo a ser escolhido;
2. Aprender a calcular a abundância dos elementos leves através da análise numérica.

Referências Bibliográficas

Arcadi,G. et al.**Roads for right-handed neutrino dark matter: Fast expansion, standard freeze-out and early matter domination.**Review of Particle Physics. Phys. Rev. D 105, 035016. 2022.

ASSIS,André K. T.; NEVES, Marcos C.D.**o que mudou na Física depois da radiação cósmica de fundo?** Revista Com Ciência, maio/2003. Disponível em: <<https://www.comciencia.br/dossies-1-72/reportagens/cosmicos/cos04.shtml>.> Acesso em: 30 de jun. de 2022

B. Ryden.**Introduction to Cosmology.**Cambridge University, 2016.

C. L. Bennett et al., Nine-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Final Maps and Results, *Astrophys. J. Suppl.* 208, 20 (2013).

DODELSON, S. SCHMIDT,F. **Modern Cosmology.** Academic Press, 2ed. 2021.

G. F. Smoot et al., **Structure in the COBE differential microwave radiometer first year maps,** *Astrophys. J.***396** , L1 (1992.)

G. F. Smoot et al., **Structure in the COBE differential microwave radiometer first year maps,** *Astrophys. J.***396** , L1 (1992).

H. V. Peiris et al. **First year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: Implications for inflation,** *Astrophys. J. Suppl.* 148, 213 (2003).

J. C. Mather et al., **A Preliminary measurement of the Cosmic Microwave Background spectrum by the Cosmic Background Explorer (COBE) satellite**, *Astrophys. J.* 354, L37 (1990).

L. Verde; T. Treu; A. G. Riess, **Tensions between the Early and the Late Universe**, *Nature Astronomy*, 3.10: 891–895 (2019), [arXiv:1907.10625 [astro-ph.CO]].

LIDDLE, A. **An Introduction to modern Cosmology**. WILEY, 2003.

MARQUES, T. **Radiação Cósmica de Fundo: Características e Atualidades**. Caderno de Física da UEFS 10, (01 e 02): 45-52, 2012.

NEVES, R. M. P. **Cosmologia de Brana**. 2014. 57p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande.

NEVES, R. M. P. **Cosmologia de Brana e Gravidade de Horndeski**. 2020. 155p. Tese de Doutorado - Universidade Federal da Paraíba.

OLIVEIRA, V. L. B. **Promovendo Matéria Escura Leve em Cosmologia Não- Padrão**. 2021. 87p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba.

Planck Collaboration, N. Aghanim et al., Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. [arXiv:1807.06209 [astro-ph.CO]]

Planck Collaboration, N. Aghanim et al., Planck 2018 results. I. Overview and the cosmological legacy of Planck. [arXiv:1807.06205 [astro-ph.CO]].

Planck Collaboration, N. Aghanim et al., Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters.

Planck Collaboration and P. A. R. Ade et al., *Astron. Astrophys.* 594, A20 (2016).

Tanabashi, M. et al. Review of Particle Physics. *Phys. Rev. D* 98, 030001. Disponível em: <<https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.98.030001>> Acesso em: 08 dez. de 2022.

The Annual Review of Nuclear and Particle Science. May/2011.61:47-68.

VILELA, T.; FERREIRA, I.S.; WUENSCHÉ, C. **A cosmologia observacional:** a radiação cósmica de fundo em microondas. *Revista USP, São Paulo*, v.62, p.104-115, jun 2004.

VILLELA, Thyrsó. **Cosmic microwave background radiation.** Magazine with Science, May/2003.

W. L. Freedman, et al., The Carnegie-Chicago Hubble Program. VIII. **An Independent Determination of the Hubble Constant Based on the Tip of the Red Giant Branch**, *Astrophys. J.* 882.1: 34, (2019), [arXiv:1907.05922 [astro-ph.CO]].

WEINBERG, S. **Cosmology.** Oxford University Press, 2008.

WEINBERG, S, **Os Três Primeiros Minutos** (Ed. Gradiva 1987).